4.3 過去の太陽活動

4.3.1 過去の太陽放射と紫外線強度変動とその推定

浅井　歩、上野　悟（京都大学）
（2020 年 12 月 1 日受付、2021 年 5 月 31 日公開）

1. 太陽総放射量（Total Solar Irradiance: TSI）、太陽放射スペクトル（Spectral Solar Irradiance: SSI）

太陽は、地球から、距離にすると約1億5000万キロメートルとはるか遠くに離れている。しかし、地球には太陽からの莫大な光のエネルギーが届いており、地球上の生命はその下で育まれる。地球で受け取る光のエネルギーは、すべての波長域での放射を全て合わせると、1361W/m^2（1平方メートルあたり1361W）にもなる。これは太陽総放射量（Total Solar Irradiance: TSI）と呼ばれる。図1上に、過去約40年間のTSIの変動を示す（Hansen et al. 2013）。TSIの変動にはところどころ短期間に急激に減少している箇所が見られる。これらは観測の誤差などではなく、大きな黒点が現れたこと、あるいは複数の黒点が現れたことなどにより、一時的にTSI が減少したことによる。4.1.1節の図1や図1下にあるように、太陽黒点数は約11年の周期で増減を繰り返すが、全体としては、黒点数の変動とTSIの変動は同期する。つまり、太陽は極大期の方が明るい。ただし、その変動幅は、一つの活動周期（つまり11年間）でせいぜい±1 W/m^2程度と、わずか0.1%（1000分の1）に過ぎない。さすがにTSIが「太陽定数」とも呼ばれることだけあって、このように、変動幅は極めて小さい。

太陽は、人間が視覚で感じることのできる可視光以外にも紫外線～X線（エックス線）～ガンマ線といった波長の短い光や、赤外線～電波と波長の長い光までさまざまな波長域にわたる光を放っている。その波長ごとの放射強度は太陽放射スペクトル（Spectral Solar Irradiance: TSI）と呼ばれる（図2A）。

地球の大気はさまざまな波長を吸収し、また大気の状況に依って吸収量が大きく変わるため、TSIやSSIは、人工衛星を用いて地球大気の外で計測される必要がある。複数の観測装置により、長期にわたって計測が継続されているものの、観測装置の向上などにより、TSIの観測値は観測装置ごとに若干異なっている。そのため、TSI の長期変動を見るためには複数の衛星によるTSI観測データをつなぎ合わせる必要があるが、観測装置同士のデータをどのようにつなぐか、その較正の手法に依って、ほぼ変動なし・緩やかに上昇・緩やかに下降と、過去40年間の変動でさえ、確定していない（Solanki et al. 2013）。1645年から1715年ごろに見られた極端な太

陽活動の低調期（マウンダー極小期）では、TSIも低下していたと推定されるが、その低下量の見積もりにおいても、0.9 W/m^2 から3 W/m^{2}と、モデルに依って大きな差がある（Schrijver et al. 2011、Krivova et al. 2010、Steinhilber et al. 2009、Solanki et al. 2013）。もし後者の見積もり通り極端にTSIが低下していたとすると、マウンダー極小期のころの寒冷化（ミニ氷河期）を説明できる可能性がある。

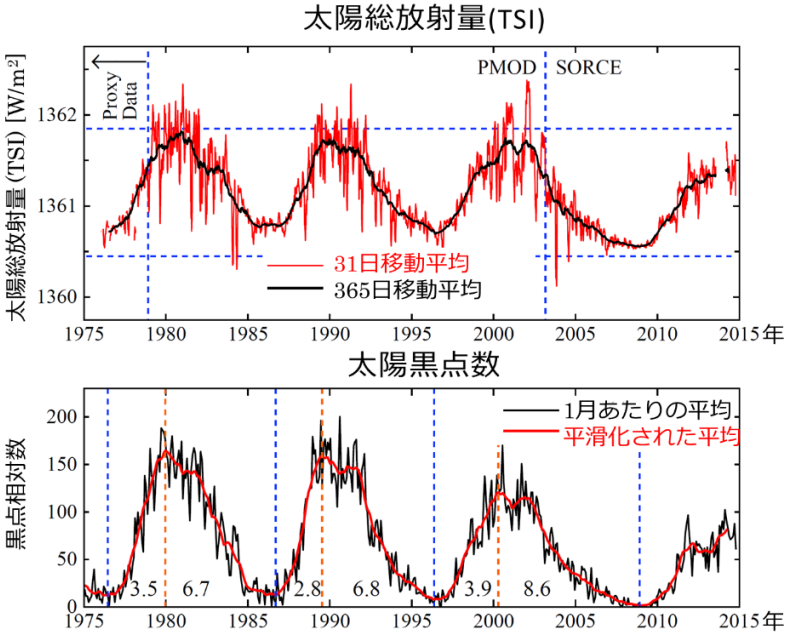

図1. 太陽総放射量（TSI：上段）と太陽黒点数（下段）の比較（Hansen et al. 2013: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Changes_in_total_solar_irradiance_and_monthly_sunspot_numbers,_1975-2013.pngを改変）

一方で、SSI、特に太陽紫外線放射の変動への関心が、近年高まっている。可視光より波長の短い光は、ほとんどは地球大気により吸収される。また、図2（B）で示すように、紫外線が吸収される地球大気層の地表面からの高度は、波長によって異なり、熱圏・中間圏・成層圏などに相当する。太陽紫外線放射もTSIと同様に、太陽活動周期と同期した変動を示すが、その変動幅はTSIのそれ（0.1%）と比べてずっと大きく、波長によっては10～100%にもなる（図2C）。変動の絶対量で見ても（図2D）、紫外線域の割合は大きく、TSIの変動は紫外線域が担っていると言える（Lean 1997など）。しかしながら、SSIについても、人工衛星に基づく継続的な観測は近年に限られるため、長期変動については、未確定な要素が多い。

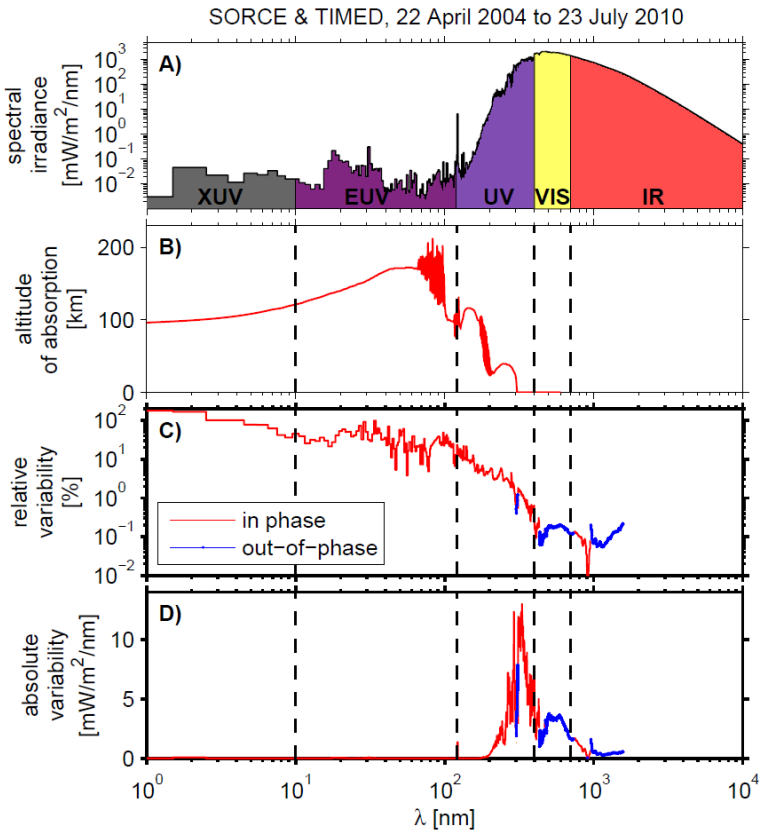

図2. A）太陽放射スペクトル（SSI）、B）その波長の光が吸収される大気層の地表面からの高度、C）太陽極大期・極小期での放射強度の変動率（%）、D）太陽極大期・極小期での放射強度の変動量（Ermolli et al. 2013より）

紫外線を吸収する地球の各大気層は、敏感に太陽紫外線変動に応答する。図3に、その中でも地磁気静穏時日変化場（geomagnetic solar quiet daily variation、地磁気Sq場：右上）と電離層全電子数（total electron content、TEC：右下）を例に挙げ、その変動を見てみる。地磁気Sq場は、約100-200nmの紫外線を高度約90-120kmの地球大気が吸収することで生じる電流に起因する地磁気変動量である。一方TECは、より高度の高い（約200-500 km）高層の電離層で、50nmよりも波長の短い紫外線により地球大気が電離されることで生じる電子の数変動である。季節変化など、地球固有の変動を差し引いた変動であるが、どちらも、黒点数の変動に同期して変動していることが確認できる。

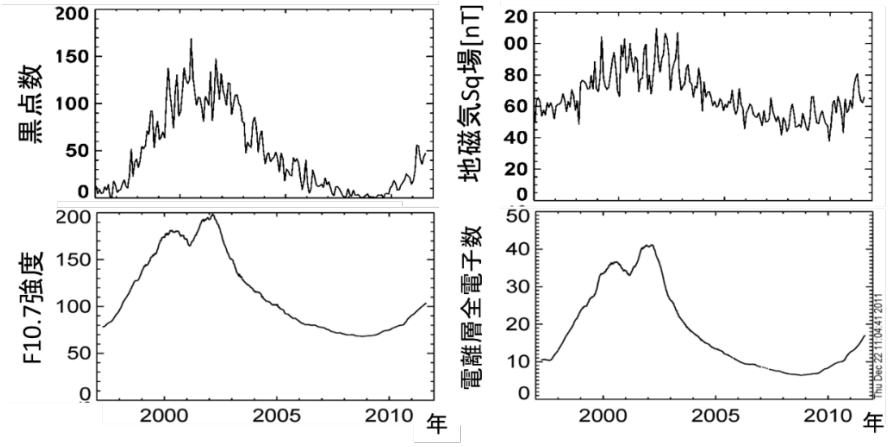

図3. 太陽黒点数（左上）、太陽電波 F10.7強度（波長10.7cm の電波：左下）、地磁気 Sq 場（グアム観測局：右下）、GPS 衛星による日本上空での電離層全電子数（右下）の変動

2. 太陽紫外線放射変動の推定

太陽紫外線放射量の人工衛星による直接観測データが無い（乏しい）時期に対しては、その変動を他の観測データから推定する必要がある。太陽紫外線は、「光球」と呼ばれる太陽の表面より上空の、「彩層」と呼ばれる温度約1万度の太陽大気から放たれている。そのため、黒点相対数の変動は、磁気活動についてある程度の指標とはなり得るものの、太陽彩層の活動度の推定には、精確性に欠ける。その代わりとして、太陽電波強度F10.7（太陽全面から放射される波長が10.7cmの電波の総量：図3左下）が、これまで頻繁に用いられてきた（Tapping & Charrois 1994）。F10.7強度は、紫外線とは全く異なる波長帯の電磁波であるが、彩層に感度があることが知られており、また、黒点相対数をはじめ、他の（特に太陽彩層に起因する）太陽活動の物理量と良い相関を示す。加えて、1947年以降安定した観測記録が蓄積されていることもあり、長期の紫外線放射変動の指標として活用されてきた。日本でも、国立天文台野辺山太陽電波観測所で、1957年からマイクロ波帯（周波数1～10GHz、波長3～30cm）での太陽観測が継続されており（Shimojo et al. 2017）、F10.7強度と同様の変動を示している。

しかし、2008年ごろの太陽活動極小期（第23期から第24期太陽活動期への移行期）は、近年の中では飛びぬけて活動度が低い「異常な」極小期であり、太陽活動の指標とされる物理量のふるまいにも違いが見られた（Fröhlich, C. 2009）。特に、TSIや紫外線域の太陽放射スペクトルで軒並み大きな低下が見られたのに対し、F10.7などの電波放射では、それほどの低下は発生しなかった（それ以前の極小期と同等であった）。このため、F10.7強度を用いた太陽紫外線放射推定では、少なくともこの太陽極小期では紫外線放射強度を過剰に見積もってしまう。

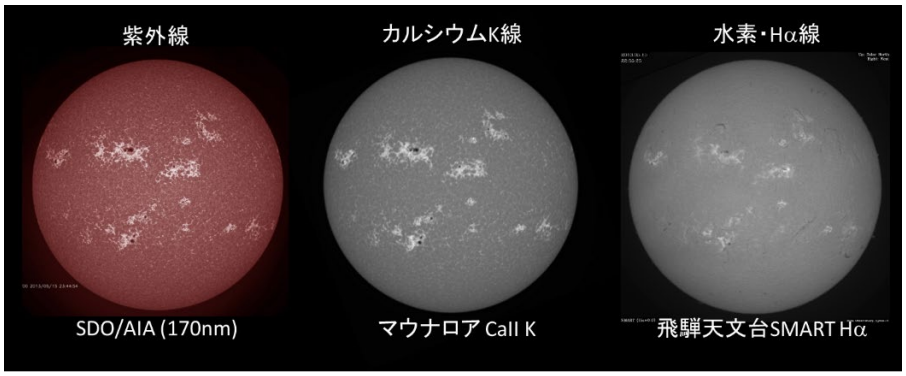

図 4. 太陽紫外線画像（左：SDO 衛星 AIA による 171nm 画像）、カルシウム K 線画像（中：ハワイ・マウナロア太陽観測所による）、Hα 線画像（右：京都大学飛騨天文台 SMART 望遠鏡による）の比較（2013 年 5 月 16 日）

先にも述べたように、太陽紫外線放射は、彩層と呼ばれる温度約1万度の太陽大気から主に放たれている（Lean 1987）。図4左には、米国の人工衛星SDO搭載の紫外線撮像装置AIAによる太陽紫外線（170nm）の画像、中と右は、可視光領域だが太陽彩層により形成されるスペクトル線（それぞれ、ハワイ・マウナロア太陽観測所で撮影されたカルシウムK線、京都大学飛騨天文台SMART望遠鏡によるHα線）で観測した太陽全面像である。これらは、特に黒点周辺の明るい領域（プラージュ）など、よく似た特徴を示していることがわかる。プラージュは、比較的（黒点ほどではないものの、静穏領域に比べて十分に）磁場強度が高く、活発に磁場活動が起きている領域である。

そのため、太陽彩層画像に基づく太陽紫外線放射量の推定が進められている（Chatzistergos et al. 2019など）。カルシウム線やHα線であれば、約100年間にわたる観測データの蓄積されている。例えば、ガラス乾板による カルシウムK 線での観測が京都大学では1928年から（Kitai et al. 2014）、 国立天文台では1917年から（Hanaoka 2013）、インド・コダイカナルでは1907年から（Hasan et al. 2010）、米国・ウィルソン山天文台では1915年から（Bertello et al. 2010）、イタリア・アルチェトリ天文台では1931年から（Ermolli et al. 2009）、それぞれ観測が開始されている。これらも、直接太陽紫外線強度を表すものではないものの、図4で見た紫外線と彩層での画像の共通点から、特にプラージュ領域の面積に着目しての太陽紫外線放射推定（Bertello et al. 2010、Chatterjee et al. 2016）などが進められている。ただし、これらの観測所でのカルシウムK線観測は、吸収線の中心部付近の積分幅がまちまちである。特に積分幅が狭い観測データ（ウイルソン山天文台など）は積分幅が広いもの（コダイカナル、京都大学など）に比べて、より高い大気層を見ており、紫外線域の中でも波長の短い光と相関が高い可能性が報告されている（Foukal et al. 2009）。ガラス乾板のデータからカルシウムK線の強度への変換（較正）は発達途上の面もあり、太陽紫外線放射強度の推定は容易ではない。

地磁気Sq場に話を戻す。地磁気Sq場は、電離圏E領域の変動に起因しており要因となる波長域がある程度限定される（Lean 1991）ことから、その変動から太陽紫外線放射を推定できるか

もしれない。一方、Elias et al.（2010）は、地球の地磁気Sq場の長期変動を調査し、「太陽活動による変動分」を差し引いてもなお単調増加の傾向が見られることを示した。さらにこの増加傾向は、より下層大気中との関連、例えば地球温暖化による変動であると提唱した。また、Shinbori et al.（2014）では、これより詳細に、かつより長期にわたって地磁気Sq場を調査し、逆に僅かに減少傾向を示すと報告した。ただし、これらの導出には、太陽紫外線変動の推定のために、前者は黒点相対数を、後者は太陽電波強度F10.7を用いている。そのため、地磁気Sq場の変動から、太陽紫外線放射による影響と、地球大気固有の変動成分を切り分けるまでには至っていない。この点でも、紫外線域でのより精確なSSI推定が望まれている。

引用文献

Bertello, L., Ulrich, R. K., Boyden, J. E.: The Mount Wilson Ca ii K Plage Index Time Series. Sol. Phys. 264, 31-44 (2010)

Chatterjee et al.: A Butterfly Diagram and Carrington Maps for Century-long CA II K Spectroheliograms from The Kodaikanal Observatory. ApJ 827, id87 (2016)

Chatzistergos, H. et al.: Analysis of full disc Ca II K spectroheliograms. II. Towards an accurate assessment of long-term variations in plage areas. A&A 625, 69 (2019)

Elias, I. et al.: Trends in the solar quiet geomagnetic field variation linked to the Earth's magnetic field secular variation and increasing concentrations of greenhouse gases. JGR 115, A08316 (2010)

Ermolli, I. et al.: The digitized archive of the Arcetri spectroheliograms. Preliminary results from the analysis of Ca II K images. A&A 499, 627-632 (2009)

Ermolli, I. et al.: Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling. Aomos. Chem. Phys., 13, 3945-3977 (2013)

Foukal, P. et al.: A Century of Solar Ca ii Measurements and Their Implication for Solar UV Driving of Climate. Sol. Phys. 255, 229-238 (2009)

Fröhlich, C.: Evidence of a long-term trend in total solar irradiance. A&A 501, L27-L30 (2009)

Hanaoka, Y.: Long-term synoptic observations of the Sun at the National Astronomical Observatory of Japan. J. Phys., Conf. Ser. 440, 012041 (2013)

Hansen, J. et al.: Assessing “Dangerous Climate Change”: Required Reduction of Carbon Emissions to Protect Young People, Future Generations and Nature. PLOS One. 8, e81648 (2013)

Hasan, S. S. et al.: Solar Physics at the Kodaikanal Observatory: A Historical Perspective. A Historical Perspective. Astrophys. Space Sci. Proc. 19, 12. (2010)

Kitai, R. et al.: Digital Archiving of Solar Synoptic Observation (1) Project Outline and Meta-data Archiving. Technical Reports from Kwasan and Hida Observatories, Graduate School of Science, Kyoto University 2-2 (2014)

Krivova, N. A., Vieira, L. E. A., Solanki, S. K.: Reconstruction of solar spectral irradiance since the Maunder minimum. JGR 115, A12112 (2010)

Lean, J.: Solar ultraviolet irradiance variations - A review. JGR 92, 839-868 (1987)

Lean, J.: Variations in the Sun's radiative output. Reviews of Geophysics, 29, 505-536 (1991)

Lean, J.: The Sun's Variable Radiation and Its Relevance For Earth. Annu. Rev. Astrophys. 35, 33-67 (1997)

Schrijver, C. J. et al.: The minimal solar activity in 2008–2009 and its implications for long-term climate modeling. GRL 38, L06701 (2011)

Shimojo, M., et al.: Variation of the Solar Microwave Spectrum in the Last Half Century. ApJ 848, id62 (2017)

Shinbori et al.: Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet daily variation. EPS 66, id155 (2014)

Solanki, S. et al.: Solar Irradiance Variability and Climate. Annu. Rev. Astrophys. 51, 311-351 (2013)

Steinhilber, F., Beer, J., Fröhlich, C.: Total solar irradiance during the Holocene. GRL 36, L19704 (2009)

Tapping, K. F.& Charrois, D. P.: Limits to the Accuracy of the 10.7-CENTIMETER Flux. Sol. Phys. 150, 305-315 (1994)